

## ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОТКЛОНЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ РЕПРЕЗЕНТАТИВНЫХ ЯЧЕЕК НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЮ И РАЗРУШЕНИЮ ПОЛИМЕРНЫХ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

### Аннотация.

*Актуальность и цели.* Одним из перспективных путей обеспечения высоких требований к эксплуатационным характеристикам современной аэрокосмической, автомобильной и военной техники при уменьшении ее массы является использование полимерных слоистых композиционных материалов (ПСКМ). Одной из причин, сдерживающих более широкое применение этих материалов, является наличие технологических дефектов, оказывающих существенное влияние на физико-механические характеристики этих материалов, включая характеристики сопротивления деформированию и разрушению. К числу технологических дефектов относятся отклонения массы и толщины ПСКМ от проектных значений, пористость, отклонения углов ориентации нитей тканей в слое, отклонения углов укладки слоев, разброс расстояния между нитями в слое ПСКМ, волнистость нитей. Целью работы является исследование влияния технологических дефектов в ПСКМ, полученных по технологиям ручного формования, вакуумного мешка и вакуумной инфузии, на их сопротивление деформированию и разрушению, учет этого влияния при проектировании.

*Материалы и методы.* В качестве исследуемых материалов выбраны полимерные слоистые композиционные материалы на основе углеродных тканей и эпоксидных связующих. При изучении технологических дефектов использованы оптические методы исследования микро- и макроструктуры, при экспериментальном исследовании сопротивления деформированию и разрушению – методы лабораторных испытаний, при теоретическом исследовании – методы компьютерного моделирования.

*Результаты.* Установлены зависимости между статистическими характеристиками технологических дефектов в ПСКМ, с одной стороны, и характеристиками его сопротивления деформированию и разрушению – с другой стороны.

*Выводы.* Влияние отклонений углов ориентации нитей тканей в слое, отклонения углов укладки слоев от проектных значений на характеристики его сопротивления деформированию и разрушению существенно и должно учитываться при проектировании. Влияние используемой технологии получения ПСКМ на его физико-механические свойства тоже должно учитываться.

**Ключевые слова:** полимерные слоистые композиционные материалы, технологические дефекты, репрезентативная ячейка, сопротивление деформированию и разрушению.

## THE INFLUENCE OF PARAMETERS' TECHNOLOGICAL DEVIATIONS OF REPRESENTATIVE CELLS ON RESISTANCE TO DEFORMATION AND FRACTURE OF POLYMER LAYER COMPOSITE MATERIALS

### Abstract.

*Background.* One of the promising ways to ensure high performance requirements of modern aerospace, automotive and military equipment while reducing its mass is to use polymer layered composite materials (PSKM). One of the reasons hindering the wider use of these materials is the presence of technological defects that have a significant impact on the physicommechanical characteristics of these materials, including the characteristics of resistance to deformation and fracture. Technological defects include deviations of the weight and thickness of PSKM from design values, porosity, deviations of the angles of orientation of the fabric threads in the layer, deviations of the angles of laying layers, the spread of the distance between the threads in the layer of PSKM, the waviness of the threads. The aim of the work is to study the influence of technological defects in PSCM, obtained by the technology of manual molding, vacuum bag and vacuum infusion, on their resistance to deformation and destruction, taking this influence into account in the design.

*Materials and methods.* As the studied materials, polymer layered composite materials based on carbon fabrics and epoxy binders were selected. In the study of technological defects, optical methods were used to study the micro- and macrostructures, while experimental studies of the resistance to deformation and fracture were used in laboratory tests, and in theoretical studies, computer simulation methods were used.

*Results.* The dependencies between the statistical characteristics of technological defects in PSKM on the one hand and the characteristics of its resistance to deformation and destruction on the other hand are established.

*Conclusions.* The influence of deviations of the angles of orientation of the fabric threads in the layer, deviations of the angles of laying layers from the design values on the characteristics of its resistance to deformation and destruction is significant and should be taken into account when designing. The influence of the technology used to obtain PSKM on its physical and mechanical properties should also be taken into account.

**Keywords:** polymer layered composite materials, technological defects, representative cell, resistance to deformation and destruction.

### Введение

Одним из перспективных путей обеспечения высоких требований к эксплуатационным характеристикам современной аэрокосмической, автомобильной и военной техники при уменьшении ее массы является использование полимерных слоистых композиционных материалов (ПСКМ). Одной из причин, сдерживающей более широкое применение этих материалов, является наличие технологических дефектов, оказывающих существенное влияние на физико-механические характеристики этих материалов, включая характеристики сопротивления деформированию и разрушению. К числу технологических дефектов относятся отклонения массы и толщины ПСКМ от проектных значений, пористость, отклонения углов ориентации нитей тканей в слое, отклонения углов укладки слоев, разброс расстояния между нитями в слое

ПСКМ, волнистость нитей. Классификация и результаты исследования морфологии технологических дефектов ПСКМ приводятся в работах [1, 2].

Для оценки сопротивления деформированию и разрушению ПСКМ может использоваться ряд характеристик, описание которых приводится в работе [3]. В данной работе из этого ряда для оценки сопротивления деформированию используются только инженерные константы, а для оценки сопротивления разрушению – только пределы прочности в направлении максимального сопротивления.

Целью работы является исследование влияния технологических дефектов в ПСКМ, полученных по технологиям ручного формования, вакуумного мешка и вакуумной инфузии, на их сопротивление деформированию и разрушению, учет этого влияния при проектировании.

Исследуемыми технологическими дефектами являются отклонения массы и толщины ПСКМ от проектных значений, пористость, отклонения углов ориентации нитей тканей в слое, отклонения углов укладки слоев, разброс расстояния между нитями в слое ПСКМ, волнистость нитей.

Под репрезентативной ячейкой понимается минимальный объем, дающий полное представление о структуре ПСКМ.

Исследование влияния отклонений технологических отклонений параметров репрезентативной ячейки ПСКМ на его сопротивление деформированию и разрушению осуществляется на примере двух модельных ПСКМ:

- первый модельный материал – из углеткани 200 г/м<sup>2</sup>, 3К и эпоксидной системы Erolam 2017, имеющий полотняное плетение (плейн);
- второй модельный материал – из углеткани 200 г/м<sup>2</sup>, 3К и эпоксидной системы Erolam 2017, имеющий саржевое плетение (твил 2/2).

Рассматриваемые материалы изготовлены по технологиям ручного формования, вакуумного мешка и вакуумной инфузии. Каждый материал состоит из четырех одинаково направленных слоев.

Репрезентативные ячейки этих материалов показаны на рис. 1, их внешний вид – на рис. 2, характеристики репрезентативной ячейки – в табл. 1.

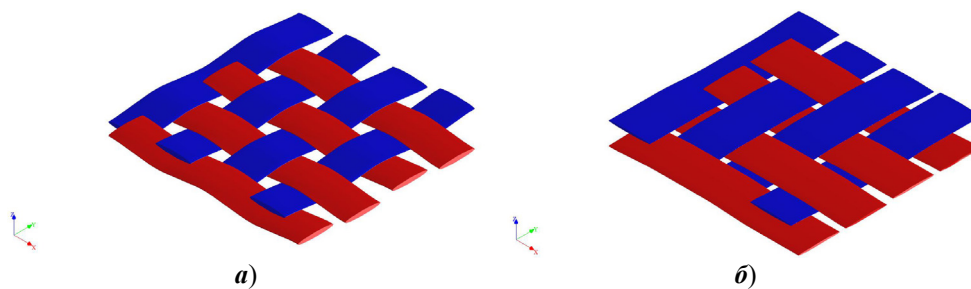


Рис. 1. Репрезентативные ячейки: *a* – плейн; *б* – твил

### 1. Технологические отклонения параметров репрезентативных ячеек полимерных слоистых композиционных материалов

Методики определения отклонений массы, толщины и пористости ПСКМ, необходимое для этого оборудование, морфологические особенности строения этих технологических дефектов приведены в работах [2, 3]. Результаты определений характеристики отклонений массы, толщины и пористости рассматриваемых ПСКМ приведены в табл. 1. Доверительные интервалы фи-

зических величин, значения которых приведены в табл. 2–7, определены при доверительной вероятности 0,9.

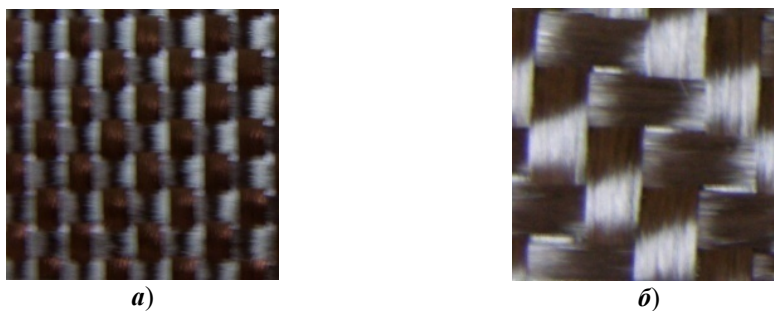


Рис. 2. Внешний вид тканевого слоя: *а* – плейн; *б* – твил

Таблица 1

Характеристики репрезентативной ячейки

Характеристика тканевого слоя	Номер материала	
	первый	второй
Тип плетения	плейн	твил 2/2
Толщина ткани, мм	0,24	0,2
Плотность укладки нитей, см <sup>-1</sup>	8,2	4,9
Ширина нитей, мм	0,91	1,78
Пористость ткани, %	53,7	44,4

Таблица 2

Характеристики отклонений массы, толщины и пористости ПСКМ

Наименование характеристики дефектности ПСКМ	Наименование технологии получения ПСКМ		
	ручное формование	вакуумный мешок	вакуумная инфузия
1. Математическое ожидание относительного отклонения массы ПСКМ, %	71,4 ± 1,25	30,3 ± 1,17	37,2 ± 0,44
2. Среднеквадратическое отклонение относительной массы ПСКМ, %	5,86	5,4	2,0
3. Математическое ожидание относительного отклонения толщины ПСКМ, %	72,6 ± 3,68	56,7 ± 2,64	54,0 ± 0,606
4. Среднеквадратическое отклонение относительной толщины ПСКМ, %	17,2	12,3	2,85
5. Математическое ожидание пористости ПСКМ, %	3,03 ± 0,90	16,46 ± 1,45	10,95 ± 0,37
6. Среднеквадратическое отклонение пористости ПСКМ, %	4,20	6,78	1,73

Методики определения отклонений угла ориентации нитей в репрезентативной ячейке и угла ориентации нитей в слое, необходимое для этого обо-

рудование, морфологические особенности строения этих дефектов приведены в работах [2, 3]. Характеристики отклонений угла ориентации нитей и углов ориентации тканевых слоев приведены в табл. 3. Доверительные интервалы физических величин, значения которых приведены в таблицах 2–5, определены при доверительной вероятности 0,9.

Таблица 3

Характеристики отклонений угла ориентации нитей и углов ориентации тканевых слоев

Наименование характеристики дефектности ПСКМ	Наименование технологии получения ПСКМ		
	ручное формование	вакуумный мешок	вакуумная инфузия
1. Математическое ожидание отклонение угла ориентации нитей от проектных значений, град	$2,9 \pm 0,35$	$2,3 \pm 0,37$	$2,2 \pm 0,34$
2. Среднеквадратическое отклонение угла ориентации нитей от проектных значений, град	2,9	3,1	2,8
3. Математическое ожидание углов ориентации тканевых слоев, град	$1,6 \pm 0,45$	$1,7 \pm 0,45$	$1,6 \pm 0,45$
4. Среднеквадратическое отклонение углов ориентации тканевых слоев, град	3,5	3,5	3,4

Параметрами репрезентативной ячейки являются относительное расстояние между нитями в слое ПСКМ и коэффициент волнистости нитей.

Относительное расстояние между нитями в слое ПСКМ (рис. 3) – отношение расстояния между нитями в репрезентативной ячейке к толщине нити. Этот параметр имеет значения от 0 до 1. Значение, большее единицы, гарантирует наличие связующего в области между нитями. Значение по умолчанию равно 0.

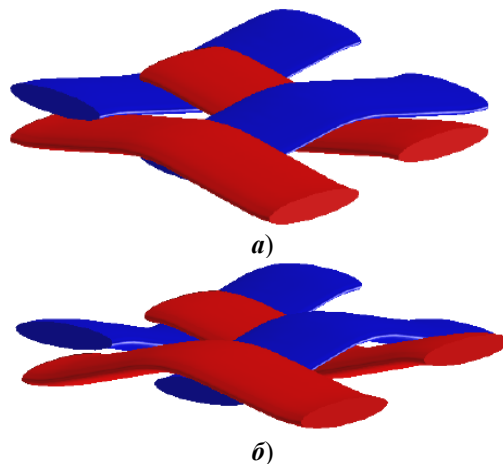


Рис. 3. Относительное расстояние между нитями в слое ПСКМ:

*a* – относительное расстояние равно нулю;

*b* – относительное расстояние равно 0,25

Коэффициент волнистости нитей (рис. 4) – параметр, характеризующий извилистость нитей утка или основы в репрезентативной ячейке. Значение коэффициента волнистости нитей по умолчанию составляет 0,5, что соответствует 50 % извилистости для нити основы и утка. Значение 1 соответствует извилистости 100 % для нитей основы и 0 % для уточной пряжи.

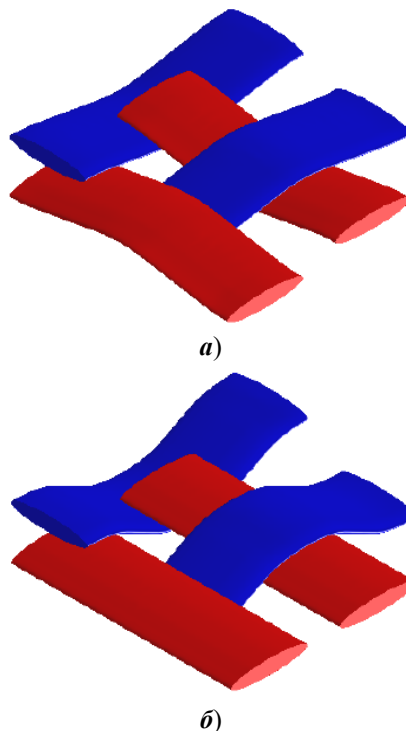


Рис. 4. Коэффициент волнистости нитей: *a* – коэффициент волнистости равен 0,5; *b* – коэффициент волнистости равен 1

Характеристики отклонений относительного расстояния между нитями в слое и коэффициента волнистости нитей в слое от проектных значений приведены в табл. 4. Доверительные интервалы физических величин, значения которых приведены в табл. 2–5, определены при доверительной вероятности 0,9.

Таблица 4  
Характеристики относительного расстояния между нитями в слое и коэффициента волнистости нитей в слое

Наименование характеристики дефектности ПСКМ	Наименование технологии получения ПСКМ		
	ручное формование	вакуумный мешок	вакуумная инфузия
1	2	3	4
1. Математическое ожидание относительного расстояния между нитями в слое ПСКМ, %	65,0 ± 0,90	30,4 ± 1,45	34,9 ± 0,37

Окончание табл. 4

1	2	3	4
2. Среднеквадратическое отклонение относительного расстояния между нитями в слое ПСКМ, %	4,20	6,78	1,73
3. Математическое ожидание коэффициент волнистости, %	15,1 ± 0,90	7,4 ± 1,45	8,9 ± 0,37
4. Среднеквадратическое отклонение коэффициент волнистости, %	4,20	6,78	1,73

## 2. Влияние технологических отклонений на сопротивление деформированию полимерных слоистых композиционных материалов

С целью исследования влияния отклонений угла ориентации нитей от проектных значений на сопротивление деформированию определены статистические характеристики инженерных констант репрезентативных ячеек при случайных значениях отклонений угла ориентации нитей. При этом инженерные константы репрезентативных ячеек определялись путем проведения компьютерного моделирования.

Статистические характеристики инженерных констант ПСКМ при случайных отклонениях угла ориентации нитей приведены в табл. 5. Инженерные константы определялись в системе координат, ось  $1$  которой направлена вдоль биссектрисы угла, образованного проекциями осей нитей на плоскость композита, ось  $2$  лежит в плоскости композита и перпендикулярна оси  $1$ , ось  $3$  образует с осями  $1$  и  $2$  левую тройку.

Статистические характеристики инженерных констант, приведенные в табл. 5, получены для первого модельного материала (из углеткани 200 г/м<sup>2</sup>, ЗК и эпоксидной системы Erolam 2017, имеющего полотняное плетение), однако качественно близкие результаты были получены и для второго модельного материала (из углеткани 200 г/м<sup>2</sup>, ЗК и эпоксидной системы Erolam 2017, имеющего саржевое плетение 2/2).

При проведении расчетов использовались статистические характеристики отклонений угла ориентации нитей, приведенные в табл. 3.

Анализ данных, приведенных табл. 5, свидетельствует о следующем:

– статистический разброс значений инженерных констант является существенным, так как, например, коэффициент вариации модуля продольной упругости  $E_1$  достигает 7 %;

– технология получения ПСКМ оказывает существенное влияние на статистический разброс значений инженерных констант, например: среднеквадратическое отклонение модулей продольной упругости  $E_1$  ПСКМ, полученных по технологии вакуумного мешка и вакуумной инфузии, отличается на 11 %.

С целью исследования влияния отклонений угла ориентации тканевых слоев от проектных значений на сопротивление деформированию определены статистические характеристики инженерных констант четырехслойных композитов при случайных значениях отклонений углов ориентации тканевых слоев. При этом инженерные константы репрезентативных ячеек определялись путем проведения компьютерного моделирования.

Статистические характеристики инженерных констант ПСКМ при случайных отклонениях угла ориентации нитей

Обозначение инженерной константы	Наименование статистической характеристики			
	Математическое ожидание	Среднеквадратическое отклонение		
		Технологии получения ПСКМ		
		ручное формование	вакуумный мешок	вакуумная инфузия
1	2	3	4	5
Модули продольной упругости, ГПа				
$E_1$	$23,5 \pm 1,53$	1,535	1,646	1,482
$E_2$	$23,5 \pm 1,53$	1,535	1,646	1,482
$E_3$	$20,2 \pm 0,02$	0,027	0,0255	0,219
Коэффициенты Пуассона				
$\nu_{12}$	$0,67 \pm 4,3 \cdot 10^{-2}$	0,043	0,463	0,042
$\nu_{21}$	$0,67 \pm 4,3 \cdot 10^{-2}$	0,043	0,463	0,042
$\nu_{13}$	$0,14 \pm 8,9 \cdot 10^{-3}$	0,008	0,095	0,009
$\nu_{31}$	$0,12 \pm 1,2 \cdot 10^{-4}$	0,001	0,001	0,001
$\nu_{23}$	$0,14 \pm 8,9 \cdot 10^{-3}$	0,008	0,001	0,009
$\nu_{32}$	$0,12 \pm 1,2 \cdot 10^{-4}$	0,001	0,001	0,0001
Модули сдвига, ГПа				
$G_{12}$	$24,3 \pm 0,06$	0,067	0,072	0,066
$G_{13}$	$6,34 \pm 0,12$	0,132	0,148	0,126
$G_{23}$	$6,34 \pm 0,12$	0,132	0,148	0,126

Исследованию были подвергнуты первый и второй модельные материалы. Они имели одинаковую проектную ориентацию тканевых слоев: одинаковое направление нитей основы.

Статистические характеристики инженерных констант ПСКМ при случайных отклонениях угла ориентации тканевых слоев приведены в табл. 6. Инженерные константы определялись в описанной ранее системе координат.

При проведении расчетов использовались статистические характеристики отклонений углов ориентации тканевых слоев, приведенные в табл. 3.

Анализ данных, приведенных табл. 6, свидетельствует о следующем:

– статистический разброс значений инженерных констант является существенным, так как, например, коэффициент вариации модуля продольной упругости  $E_1$  достигает 8,3 %;

– технология получения ПСКМ оказывает существенное влияние на статистический разброс значений инженерных констант, например: среднеквадратическое отклонение модулей продольной упругости  $E_1$  ПСКМ, полученных по технологии вакуумного мешка и вакуумной инфузии, отличается на 10,7 %.

С целью исследования влияния относительного расстояния между нитями в слое и коэффициента волнистости нитей в слое на сопротивление де-



формированию были определены статистические характеристики инженерных констант репрезентативных ячеек при случайных отклонениях относительного расстояния между нитями в слое и коэффициента волнистости нитей в слое.

Таблица 6  
Статистические характеристики инженерных констант ПСКМ при случайных отклонениях угла ориентации тканевых слоев

Обозначение инженерной константы	Наименование статистической характеристики			
	Математическое ожидание	Среднеквадратическое отклонение		
		Технологии получения ПСКМ		
		ручное формование	вакуумный мешок	вакуумная инфузия
Модули продольной упругости, ГПа				
$E_1$	$23,5 \pm 1,84$	1,838	1,961	1,774
$E_2$	$23,5 \pm 1,84$	1,838	1,961	1,774
$E_3$	$20,2 \pm 0,03$	0,026	0,028	0,025
Коэффициенты Пуассона				
$\nu_{12}$	$0,67 \pm 4,6 \cdot 10^{-2}$	0,046	0,049	0,044
$\nu_{21}$	$0,67 \pm 4,6 \cdot 10^{-2}$	0,046	0,049	0,044
$\nu_{13}$	$0,14 \pm 9,3 \cdot 10^{-3}$	0,009	0,010	0,009
$\nu_{31}$	$0,12 \pm 1,0 \cdot 10^{-4}$	0,001	0,000	0,000
$\nu_{23}$	$0,14 \pm 9,3 \cdot 10^{-3}$	0,009	0,010	0,009
$\nu_{32}$	$0,12 \pm 1,2 \cdot 10^{-4}$	0,001	0,001	0,0001
Модули сдвига, ГПа				
$G_{12}$	$24,3 \pm 0,08$	0,081	0,085	0,078
$G_{13}$	$6,34 \pm 0,15$	0,154	0,164	0,148
$G_{23}$	$6,34 \pm 0,15$	0,154	0,164	0,148

Статистические характеристики инженерных констант определялись для первого и второго модельного материалов, аналогично тому, как это было сделано при исследовании влияния отклонений угла ориентации нитей.

Анализ полученных данных не выявил существенного влияния относительного расстояния между нитями в слое и коэффициента волнистости нитей в слое на значения инженерных констант.

### 3. Влияние технологических отклонений на сопротивление разрушению полимерных слоистых композиционных материалов

С целью исследования влияния отклонений угла ориентации нитей от проектных значений на сопротивление разрушению проведено компьютерное моделирование деформирования до разрушения репрезентативных ячеек рассматриваемых модельных композитов при различных значениях угла приложения нагрузки. При проведении расчетов использовались статистические характеристики отклонений угла ориентации нитей, приведенные в табл. 3.

Статистические характеристики предела прочности ПСКМ при случайных значениях угла ориентации нитей приведены в табл. 7. Статистические характеристики приведены для первого модельного материала.

Таблица 7  
Статистические характеристики предела прочности ПСКМ при случайных значениях угла ориентации нитей, МПа

Угол приложения нагрузки, град	Наименование статистической характеристики			
	Математическое ожидание	Среднеквадратическое отклонение		
		Технологии получения ПСКМ		
		ручное формование	вакуумный мешок	вакуумная инфузия
0	987,2 ± 15,5	79	84,4	76,3
11,25	290,9 ± 4,6	23,2	24,9	22,5
22,5	155,3 ± 2,4	12,4	13,3	12
45	105,2 ± 1,6	8,4	9	8,2

Анализ данных, приведенных табл. 7, свидетельствует о следующем:

– предел прочности рассматриваемого ПСКМ существенно зависит от направления приложения нагрузки, при изменении направления приложения нагрузки от 0 до 45° предел прочности уменьшается в 9,4 раза;

– технология получения ПСКМ оказывает существенное влияние на статистический разброс предела прочности, например: среднеквадратическое отклонение предела прочности ПСКМ, полученных по технологии вакуумного мешка и вакуумной инфузии, при угле приложения нагрузки, равном 0, отличается на 10,6 %.

С целью исследования влияния отклонений углов ориентации слоев от проектных значений на сопротивление разрушению проведено компьютерное моделирование для определения предела прочности в направлении наименьшего сопротивления композита при случайном распределении углов ориентации тканевых слоев. При проведении расчетов использовались статистические характеристики отклонений угла ориентации нитей, приведенные в табл. 3. Статистические характеристики предела прочности ПСКМ при случайных углах ориентации тканевых слоев, приведены в табл. 8. Статистические характеристики приведены для первого модельного материала.

Таблица 8  
Статистические характеристики предела прочности ПСКМ при случайных углах ориентации тканевых слоев, МПа

Угол приложения нагрузки, град	Наименование статистической характеристики			
	Математическое ожидание	Среднеквадратическое отклонение		
		Технологии получения ПСКМ		
		ручное формование	вакуумный мешок	вакуумная инфузия
0	1046,4 ± 16,4	83,7	89,5	80,8
11,25	308,4 ± 4,8	24,7	26,4	23,8
22,5	164,6 ± 2,6	13,2	14,4	12,7
45	111,5 ± 8,9	8,9	9,5	8,6

Анализ данных, приведенных табл. 8, свидетельствует о том, что предел прочности рассматриваемого ПСКМ в направлении максимального сопротивления увеличивается при появлении разброса углов ориентации тканевых слоев. Увеличение предела прочности составляет 6 %.

### Заключение

В работе исследовано влияние таких технологических дефектов, как отношение отклонения массы и толщины от проектных значений, пористость, отклонения углов ориентации нитей однонаправленных слоев или тканей, отклонения углов укладки слоев, разброс расстояния между нитями в слое ПСКМ, волнистость нитей, на сопротивление деформированию и разрушению ПСКМ. Определены количественные показатели этого влияния.

В результате исследования установлено:

– отклонения угла ориентации нитей в слое и углов ориентации тканевых слоев от проектных значений приводят к существенному изменению инженерных констант, а также пределов прочности композита при всех направлениях приложения нагрузки. Статистический разброс углов ориентации нитей в слое и углов ориентации тканевых слоев приводит к существенному разбросу инженерных констант и пределов прочности модельных ПСКМ;

– технология получения ПСКМ оказывает существенное влияние на статистический разброс значений инженерных констант и пределов прочности композита в направлении его наибольшего сопротивления;

– влияние относительного расстояния между нитями в слое и коэффициента волнистости нитей в слое на сопротивление деформированию и разрушению модельных материалов незначительное;

– определенные при проведении исследования статистические характеристики инженерных констант и пределов прочности модельных материалов должны быть использованы при проектировании изделий из них.

### Библиографический список

1. **Карташова, Е. Д.** Технологические дефекты полимерных слоистых композиционных материалов / Е. Д. Карташова, А. Ю. Муйземнек // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2017. – № 2 (42). – С. 79–89.
2. **Карташова, Е. Д.** Исследование пористости полимерных слоистых композиционных материалов, полученных методом вакуумной инфузии / Е. Д. Карташова, М. А. Косова, А. А. Желудкова, А. Ю. Муйземнек // Инновации технических решений в машиностроении и транспорте : материалы III Всерос. науч.-техн. конф. – Пенза, 2018. – С. 185–188.
3. **Карташова, Е. Д.** Влияние технологических отклонений расположения армирующего в полимерном слоистом композиционном материале на сопротивление деформированию и разрушению / Е. Д. Карташова, А. Ю. Муйземнек // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2017. – № 3 (43). – С. 134–145.

### References

1. Kartashova E. D., Muzyemnek A. Yu. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2017, no. 2 (42), pp. 79–89. [In Russian]

2. Kartashova E. D., Kosova M. A., Zheludkova A. A., Muyzemnek A. Yu. *Innovatsii tekhnicheskikh resheniy v mashinostroenii i transporte: Materialy III Vseros. nauch-tekhn. konf.* [Innovation of technical solutions in mechanical engineering and transport: proceedings of the III All-Russian scientific and technical conference]. Penza, 2018, pp. 185–188. [In Russian]
3. Kartashova E. D., Muyzemnek A. Yu. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2017, no. 3 (43), pp. 134–145. [In Russian]

---

***Карташова Екатерина Дмитриевна***  
аспирант, Пензенский государственный  
университет (Россия, г. Пенза,  
ул. Красная, 40)

E-mail: <mailto:katrina89@yandex.ru>

***Kartashova Ekaterina Dmitrievna***  
Postgraduate student, Penza State  
University (40 Krasnaya street,  
Penza, Russia)

***Муземнек Александр Юрьевич***  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой теоретической  
и прикладной механики и графики,  
Пензенский государственный  
университет (Россия, г. Пенза,  
ул. Красная, 40)

E-mail: [muyzemnek@yandex.ru](mailto:muyzemnek@yandex.ru)

***Muyzemnek Aleksandr Yur'evich***  
Doctor of engineering sciences, professor,  
head of the sub-department of theoretical  
and applied mechanics and graphics,  
Penza State University (40 Krasnaya  
street, Penza, Russia)

---

**Образец цитирования:**

Карташова, Е. Д. Влияние технологических отклонений параметров репрезентативных ячеек на сопротивление деформированию и разрушению полимерных слоистых композиционных материалов / Е. Д. Карташова, А. Ю. Муземнек // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 2 (54). – С. 97–108. – DOI 10.21685/2072-3059-2020-2-10.